

Казакбаев В.М., Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Дмитриевский А.А.,
Сафин Н.Р.

Kazakbaev V.M., Dmitrievskii V.A., Prakht V.A., Dmitrievskii A.A., Safin N.R.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНВЕРТОРА ДЛЯ ДВУХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

THE MATHEMATICAL SIMULATION OF BEHAVIOR MODES OF A TWO-PHASE INVERTER FOR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

stepan1789@yandex.ru

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

г. Екатеринбург



Статья посвящена компьютерному математическому моделированию процессов, протекающих в инверторе двухфазного вентильного реактивного двигателя (ВРД). Результаты работы могут быть использованы при проектировании привода на основе ВРД и в образовательных целях для проведения лабораторных и компьютерных практикумов по исследованию ВРД студентами электротехнических специальностей. Применимость этой модели в учебном процессе обусловлена высокой степенью её наглядности.

The article is devoted to mathematical simulation of processes which are being in a two-phase switched reluctance electric motor (SRM) inverter. The issues are able to be used either for designing of a SRM electric drive or for education purposes: laboratory and computer practical training sessions of the electrical motor study by electrotechnical students. The applicability of the model for the education process is defined due to its high visualization.

Использование компьютерных математических моделей в процессе изучения студентами электрических машин (ЭМ) и их источников питания позволяет сформировать у студентов более глубокое понимание физических процессов в электрических цепях и электромеханических преобразователях, а также повысить наглядность изложения учебного материала и облегчить изучение конструкции и принципа действия машины.

Типом машин, получившим существенное развитие и значительно расширившим область своего применения в последние годы стали вентильные реактивные машины («switched reluctance motors»). Такие двигатели обладают высокими рабочими и регулировочными характеристиками, простой и надежной конструкцией, не имеют постоянных магнитов и могут быть спроектированы для работы в приложениях с высокой скоростью вращения [1].

Сложность изучения и проектирования ВРД заключается в большой степени интеграции электрического двигателя и его источника питания (инвертора), которая ведет к необходимости их совместного анализа. Двигатель является сложным нелинейным объектом управления; для создания энергоэффективных режимов ее работы требуется интеллектуальная система оптимального управления, работающая на основе математической модели машины.

На рис. 1а представлен один из вариантов конструкции вентильного реактивного двигателя – двухфазный ВРД. Он имеет основую обмотку и вспомогательную обмотку, служащую для запуска двигателя и для обеспечения коммутации основной обмотки в рабочем режиме [2].

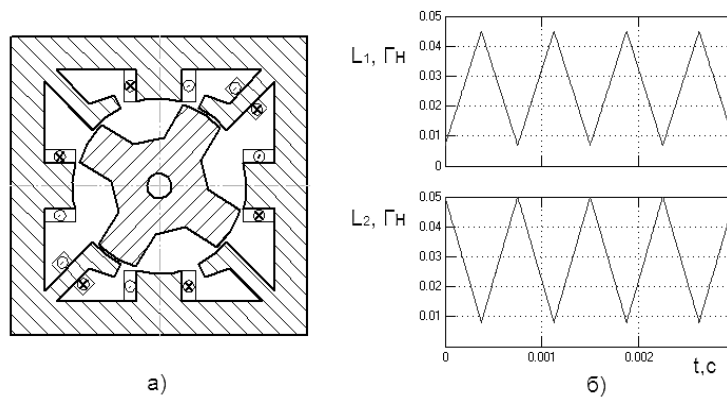


Рис. 1 – Двухфазный вентильный реактивный двигатель [2] (а) и значения индуктивности его фаз, принятые для расчета (б)

Особенностью данного двухфазного ВРД является то, что он питается не от обычного двухключевого инвертора (рисунок 2а), а от инвертора, имеющего один управляемый транзисторный ключ (рисунок 2б). Такая конструкция позволяет существенно снизить стоимость схемы инвертора для двигателя.

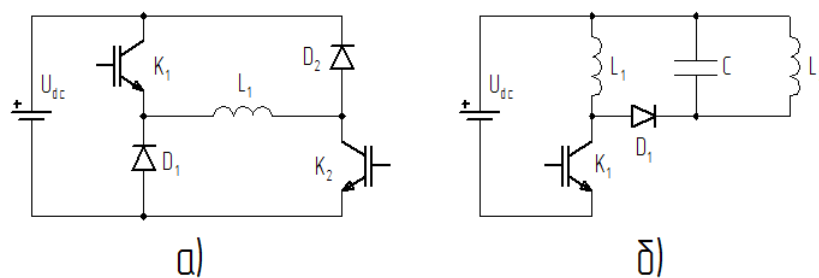


Рис. 2 – Обычный однофазный асимметричный инвертор (а) и рассматриваемый одноключевой инвертор (б)

Используются различные подходы к компьютерному моделированию электротехнических систем. В последнее время наиболее часто применяются, либо собственноручно написанные расчетные программы на языках программирования высокого уровня («Delphi», «C/C++» и др.), либо специализированные программные пакеты. Специализированные программные библиотеки (например «SPICE», «LabVIEW» или библиотеки «Simulink», «SimPowerSystems» среды «MATLAB»), как правило, реализуют схемный подход к постановке решаемой задачи.

Несомненным достоинством использования библиотек схемного моделирования, к которым относятся Simulink и SimPowerSystems, используемые в данной работе, является удобство моделирования многокомпонентных систем с гибкой структурой. Это особенно важно при проектировании и изучении ВРД, поскольку на практике применяются самые различные схемы инвертора и конструкции электромеханического преобразователя для ВРД.

Составим систему уравнений для моделирования инвертора (рисунок 2б). Транзистор K1 и диод D1 будем считать идеальными ключами:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_1}{dt} = s \cdot (U_{dc} - R_1 \cdot i_1) + (1-s) \cdot (U_c - R_1 \cdot i_1); \\ \frac{d\Psi_2}{dt} = U_c - R_2 \cdot i_2; \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{i_c}{C} = \frac{(1-s) \cdot i_1 - i_2}{C}, \end{cases} \quad (1)$$

где Ψ_1, Ψ_2 – полные потокосцепления основной и вспомогательной обмоток двигателя соответственно; R_1, R_2 – активные сопротивления основной и вспомогательной обмоток двигателя; C – емкость конденсатора, U_{dc} – напряжение звена постоянного тока, U_c – напряжение на конденсаторе, i_1, i_2 – токи основной и вспомогательной обмоток двигателя соответственно, i_c – ток конденсатора; $s = 0$ – если ключ K_1 закрыт и $s = 1$, если ключ K_1 открыт.

Исходя из того, что потокосцепление обмотки вентильного реактивного двигателя определяется выражением [1,2]:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial \gamma} \cdot \frac{d\gamma}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial L}{\partial \gamma} \cdot \omega \cong L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial L}{\partial \gamma} \cdot \omega \cdot i, \quad (2)$$

где γ – угол поворота ротора, ω – угловая скорость ротора, для расчета инвертора можно составить упрощенную модель упрощенную модель фазных обмоток ВРД.

Примем скорость двигателя постоянной $\omega = \text{const}$. Также примем, что индуктивность обмоток двигателя изменятся во времени в соответствии с функциями $L_1 = f_1(t)$ (основания обмотка) и $L_2 = f_2(t)$ (вспомогательная обмотка), изображенными на рисунке 2б, варьируясь по линейному закону между значениями, указанными в таблице 1. Максимальное значение индуктивности обмотки соответствует случаю, когда полюса ротора находятся прямо против полюсов статора, где расположена данная обмотка. Минимальное значение – случаю, когда полюса ротора находятся точно между соответствующих полюсов статора. Поскольку за один оборот рассматриваемого двигателя мимо полюса статора проходят четыре полюса ротора, то частота графиков изменения индуктивности определится как $f = \frac{4 \cdot \omega}{2 \cdot \pi}$. При этом графики для основной и для вспомогательной обмотки, из-за пространственного смещения полюсов на 45° геометрических, будут находиться в противофазе (рисунок 2б).

При таком характере изменения индуктивности $\frac{\partial L}{\partial \gamma} \cdot \omega = \text{const}$. Тогда, вводя обозначения $R_{\text{equ}1} = R_1 + \frac{\partial L_1}{\partial \gamma} \cdot \omega$; $R_{\text{equ}2} = R_2 + \frac{\partial L_2}{\partial \gamma} \cdot \omega$, систему (1) можно переписать как:

$$\begin{cases} L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = s \cdot (U_{dc} - R_{\text{equ}1} \cdot i_1) + (1-s) \cdot (U_c - R_{\text{equ}1} \cdot i_1); \\ L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} = U_c - R_{\text{equ}2} \cdot i_2; \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{i_c}{C} = \frac{(1-s) \cdot i_1 - i_2}{C}. \end{cases} \quad (3)$$

Составим «SimPowerSystems» схему для решения RLC-цепи, описываемой уравнениями (3) (рисунок 3а). Роль множителей “s” и “1-s” в модели играют идеальные ключи.

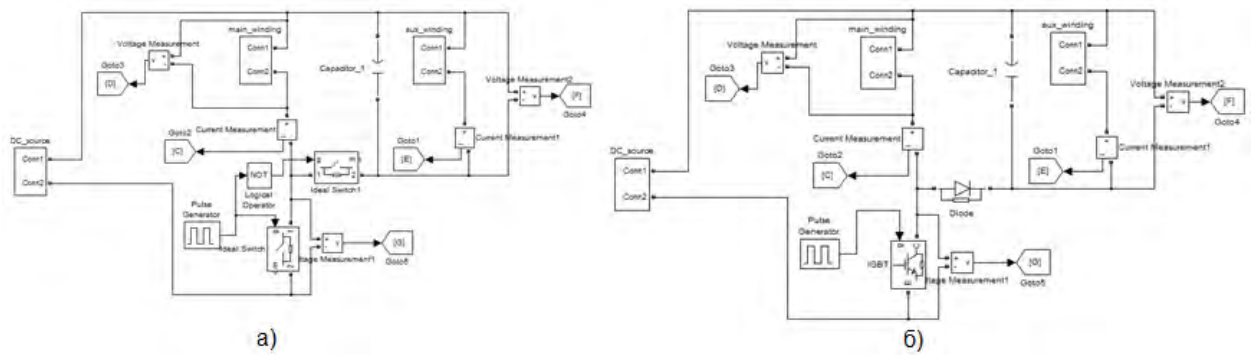


Рис. 3 – Simulink модель инвертора с идеальными ключами

При необходимости более точного моделирования свойств реальных полупроводниковых приборов идеальные ключи могут быть легко заменены на модели этих приборов из библиотеки «SimPowerSystems» (рисунок 4). Моделирование катушек, индуктивность которых меняется во времени по законам (рисунок 2б), выполним с помощью SimPowerSystems подсистемы, реализующей элемент электрической цепи с вольтамперной характеристикой (ВАХ), задаваемой пользователем (рисунок 4). ВАХ такой катушки можно описать с помощью передаточной функции вида:

$$f(t) = \frac{1}{L(t) \cdot p + R}, \quad (4)$$

где $L(t)$ – заданная функция времени.

Поскольку в стандартной Simulink библиотеке отсутствует функция такого типа, применим пользовательскую S-функцию (Simulink функция, программа для которой пишется пользователем), реализующую передаточную функцию с переменными параметрами. Моделирование SimPowerSystems элементов с произвольной ВАХ и создание пользовательских S-функций подробно описано в [3].

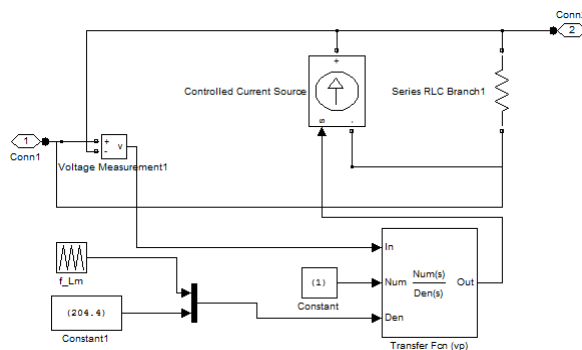


Рисунок 4 – Simulink модель обмотки двигателя

Используем изложенную выше методику, для расчета параметров обмоток L_1 и L_2 , и выполним расчет схемы (рисунок 3а). При этом будем варьировать значение емкости конденсатора $C = 0,1 \text{ мкФ}$, 1 мкФ , 10 мкФ . Напряжение в звене постоянного тока примем $U_{dc} = 100 \text{ В}$.

Таблица 1 – Параметры моделируемого двигателя

Параметр	Значение
$L_{1\max}$, максимальная индуктивность основной обмотки, Гн	0,045
$L_{1\min}$, минимальная индуктивность основной обмотки, Гн	0,0069
R_1 , активное сопротивление основной обмотки, Ом	1,2
$L_{2\max}$, максимальная индуктивность вспомогательной обмотки, Гн	0,05
$L_{2\min}$, минимальная индуктивность вспомогательной обмотки, Гн	0,0081
R_2 , активное сопротивление вспомогательной обмотки, Ом	4
ω , номинальная скорость вращения, об/мин	40000

На рисунках 5,6 и 7 верхний график показывает форму токов в основной (темный) и вспомогательной (светлый) обмотке ВРД. Нижний – форму напряжений на транзисторе K_1 (темный) и конденсаторе C (светлый).

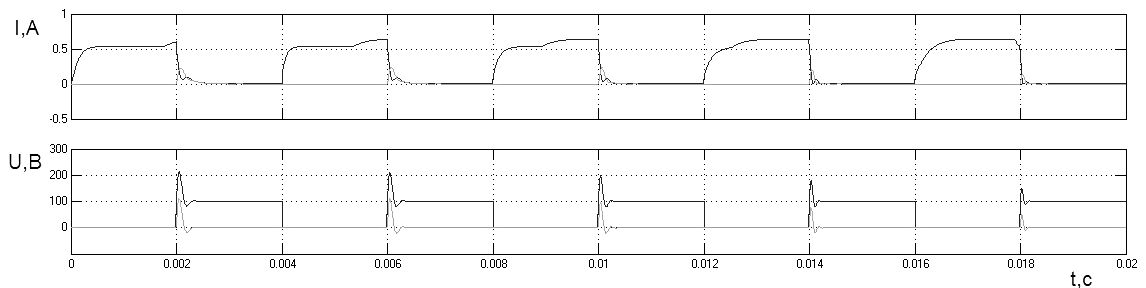


Рисунок 5 – Расчетные графики токов и напряжений инвертора при $C = 0,1$ мкФ

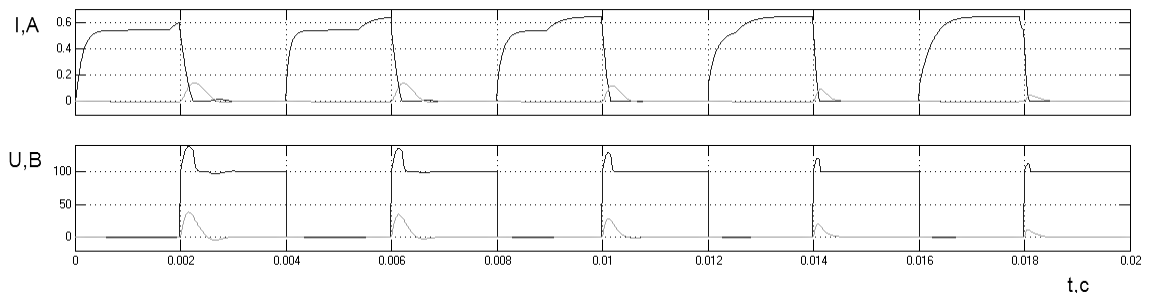


Рисунок 6 – Расчетные графики токов и напряжений инвертора при $C = 1$ мкФ

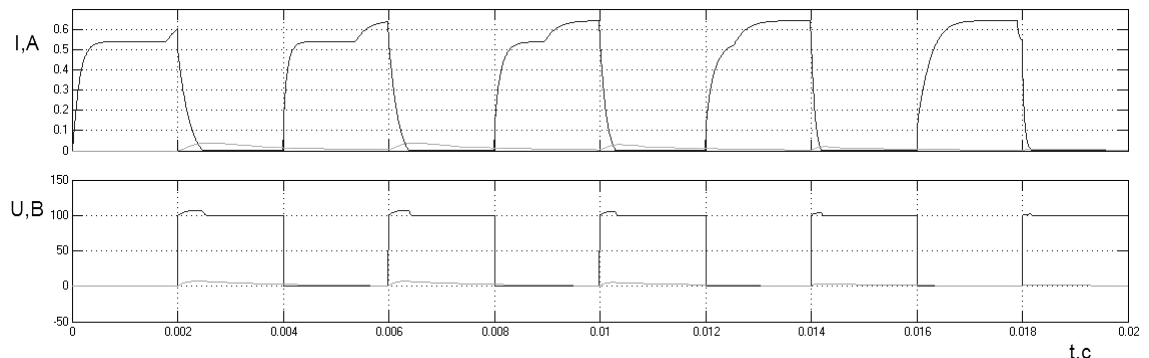


Рисунок 7 – Расчетные графики токов и напряжений инвертора при $C = 10$ мкФ

Из приведенных расчетов (рисунок 5, рисунок 6, рисунок 7) видно, что увеличение емкости конденсатора C уменьшает перенапряжение на элементах инвертора, но ведет к увеличению времени затухания токов обмоток L_1 и L_2 после закрытия транзистора, что, в свою очередь приводит к уменьшению полезного момента ВРД [2]. Этот пример демонстрирует, что

при проектировании ВРД необходимо одновременно рассматривать, как электромагнитные процессы, происходящие в электромеханическом преобразователе, так и в инверторе. Эти два элемента системы оказывают сильное, комплексное влияние друг на друга. Таким образом, создание двигателя с наилучшими рабочими свойствами сопряжено с поиском компромисса между комбинациями параметров системы, которые обеспечивают, каждая в отдельности, наилучшие условия коммутации ключа инвертора, наименьший номинал элементов инвертора, максимальный рабочий момент двигателя, максимальный пусковой момент двигателя и др.

Описанная в статье математическая модель может быть использована при проектировании двухфазных вентильных реактивных двигателей и их источников питания, а также при изучении конструкции принципа действия таких двигателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичев, Вентильно-индукторные двигатели, учебное пособие по курсу «Специальные электрические машины» для студентов, обучающихся по направлению 180100 «Электромеханика». – М: МЭИ, 2003.
2. Krishnan, R., Staley, A.M., Sitapati, K., A Novel Single-phase Switched Reluctance Motor Drive System, in Conf. Rec. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON '01, 2001, vol. 2, pp. 1488–1493.
3. Консультационный центр компании SoftLine «Matlab.exponenta.ru» [Электронный ресурс];
4. <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book2/15.php>